

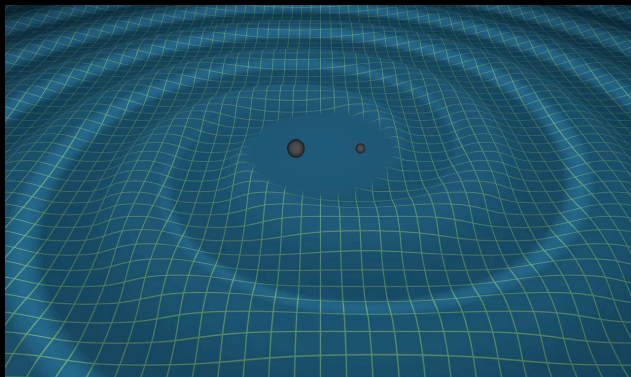
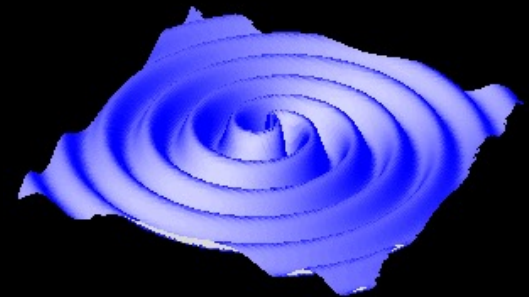


Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



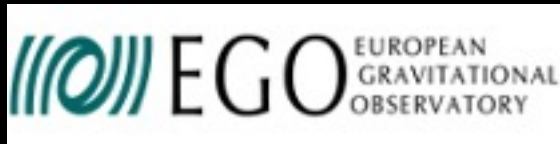
L'esplorazione dell'Universo e la scoperta delle onde gravitazionali

Pia Astone, INFN Roma



*International Day of Women and Girls in Science.
Roma, 11 febbraio 2022.*

VIRGO ha iniziato la presa dati nel 2003
E ha rivelato il primo segnale nel 2017



11 paesi diversi
99 istituzioni
~ 500 membri



<http://public.virgo-gw.eu/la-collaborazione-virgo/>

La rete di cacciatori terrestri di onde gravitazionali



LIGO
Hanford



GEO600



KAGRA

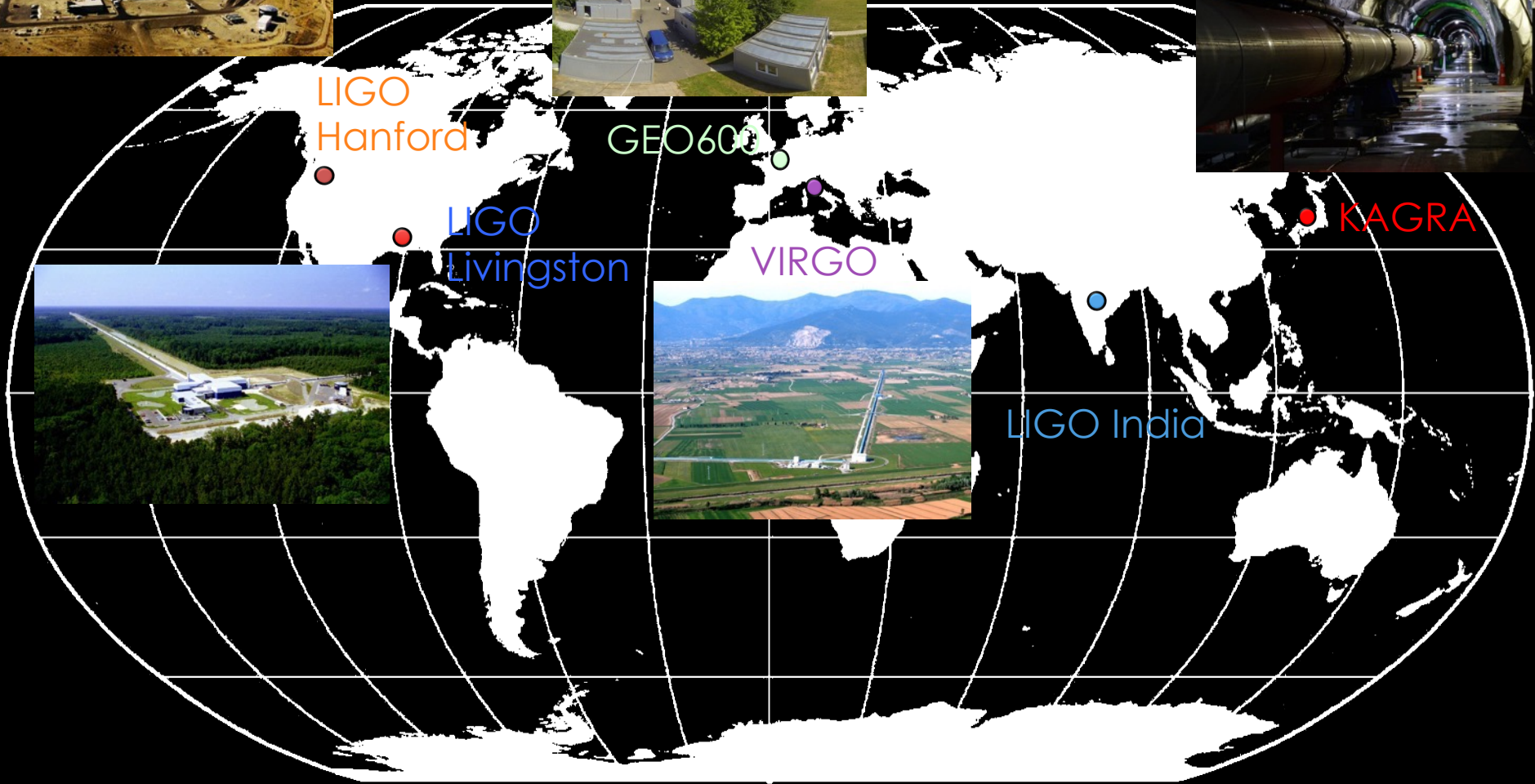


LIGO
Livingston

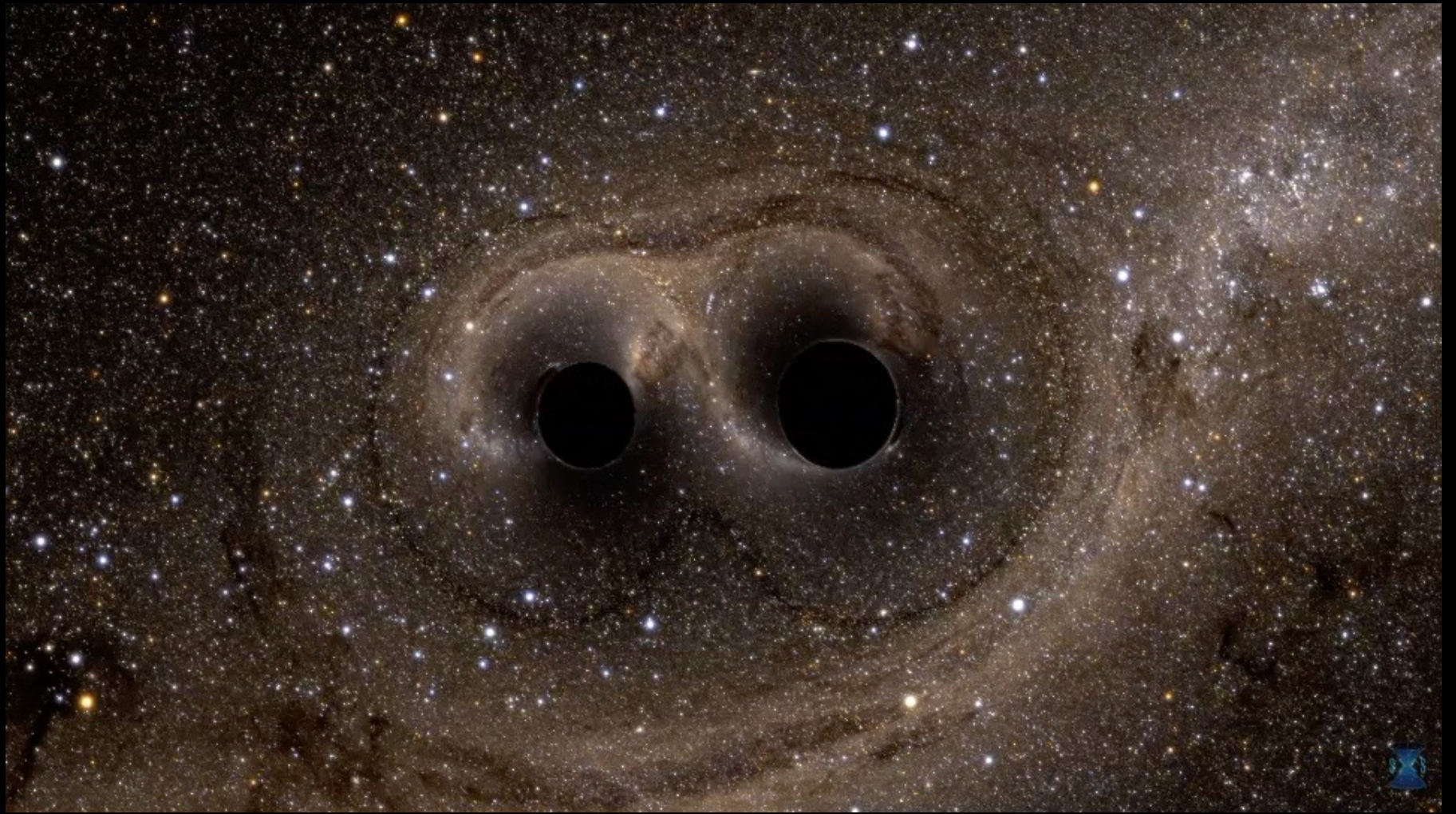


VIRGO

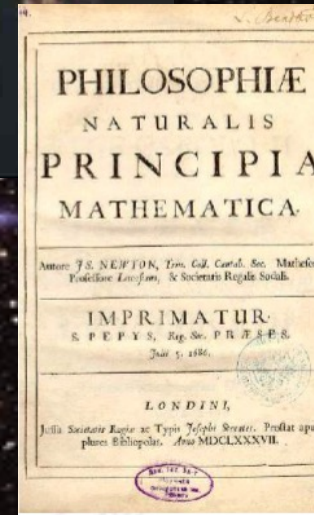
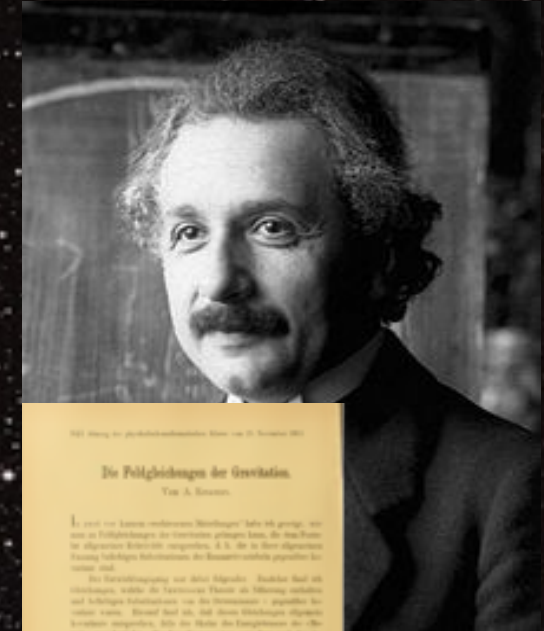
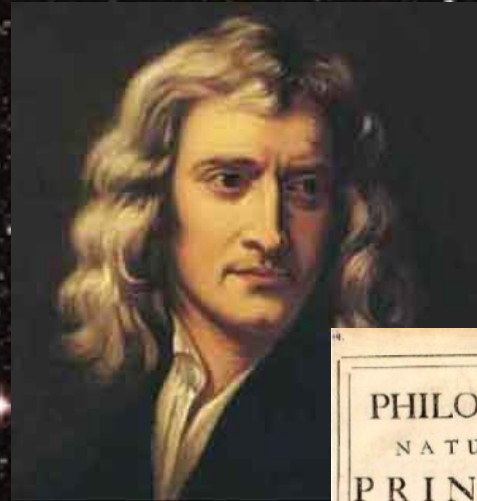
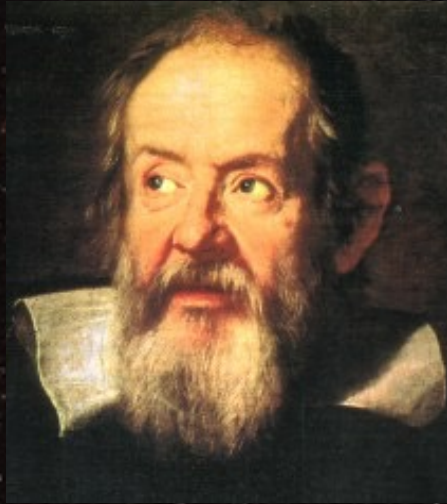
LIGO India



1,3 miliardi di anni fa...



I 3 pilastri della gravità



Galilei
1564-1642

Newton
1642-1726

Einstein
1879-1955

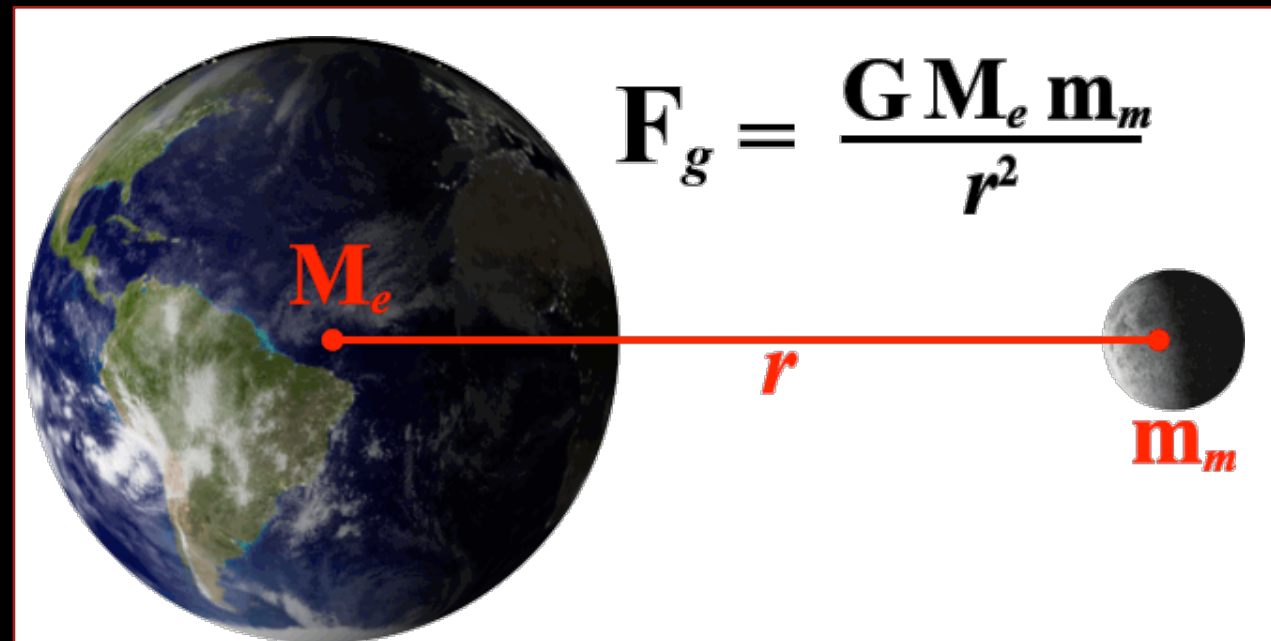
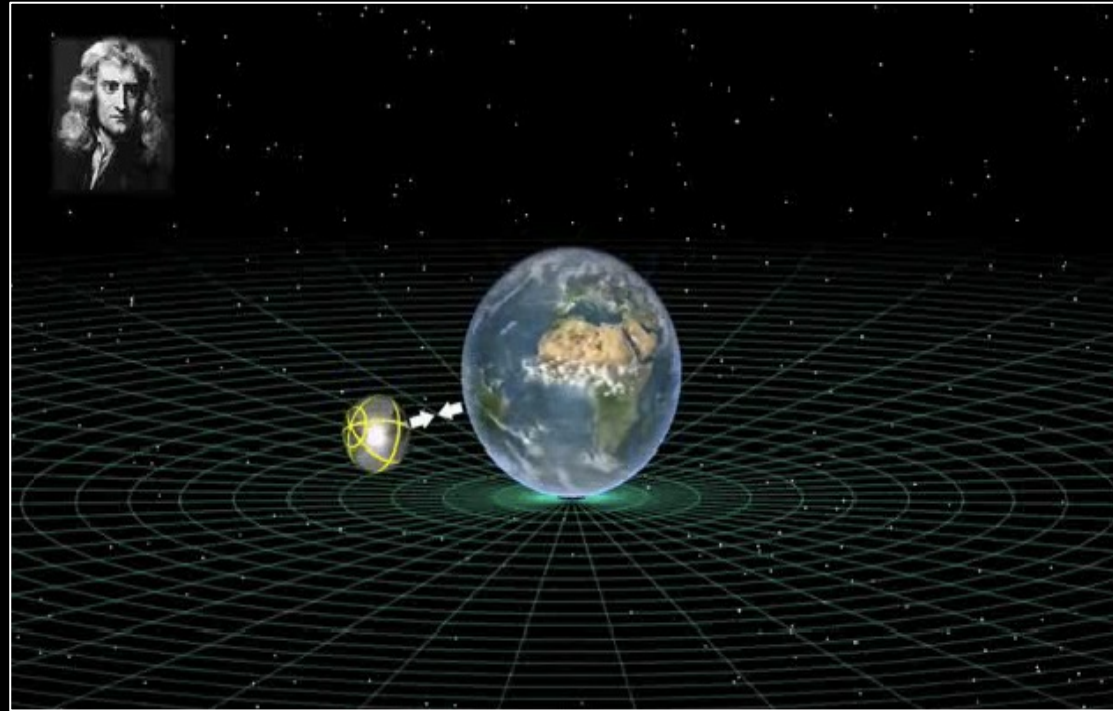
LA GRAVITÀ DI NEWTON

Spazio e tempo sono assoluti e separati

La luce viaggia in linea retta

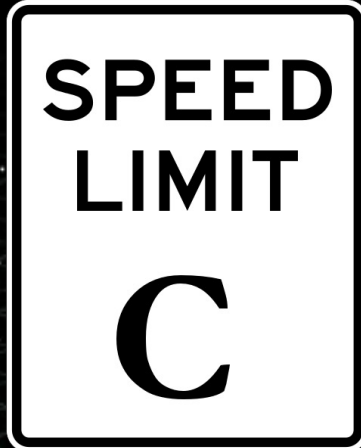
La gravità è' una forza fra corpi

L' interazione gravitazionale è istantanea





**1915 RG,
La gravità NON è una forza,
è curvatura dello spazio-tempo**

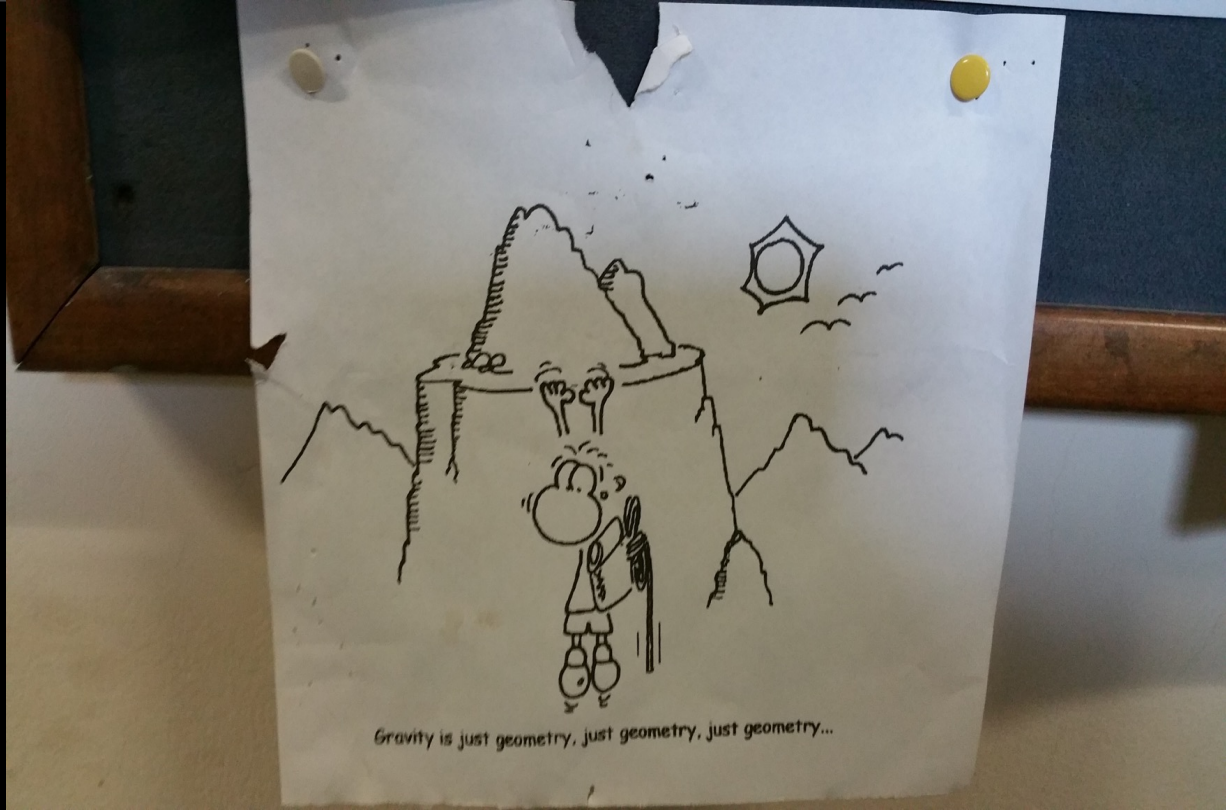
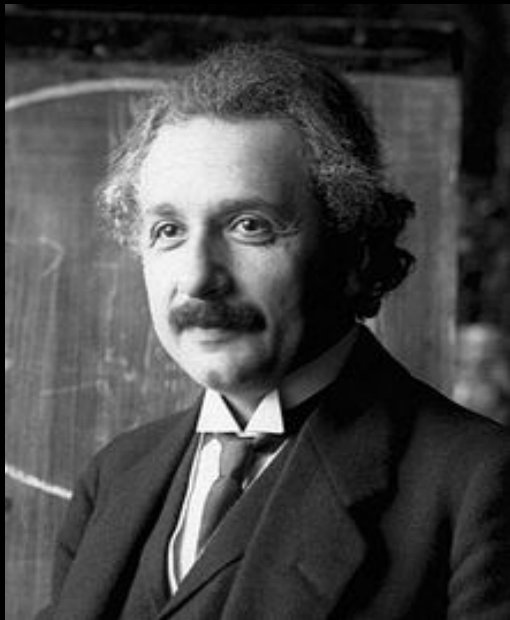
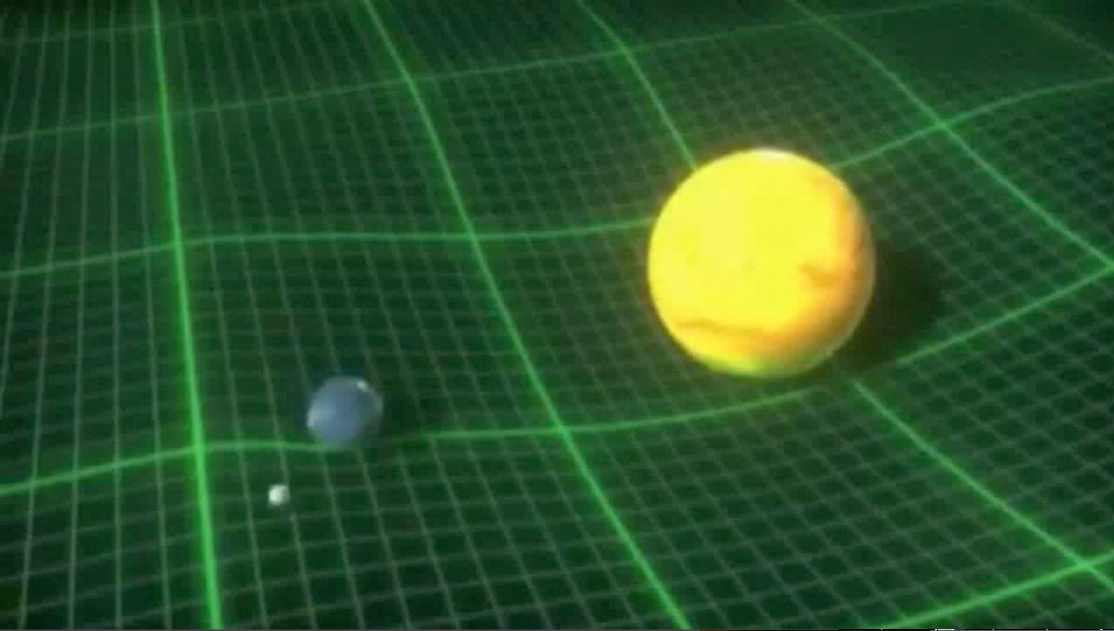


Teorizza che un corpo massiccio deformi lo spazio e il tempo

Il risultato è uno spazio tempo curvo

Le interazioni gravitazionali si propagano alla velocità della luce

La luce segue il percorso più corto nello spazio-tempo curvo



LA MATERIA DICE ALLO SPAZIO-TEMPO COME CURVARSI ¹⁰



Stella
media

Nana
Bianca

Stella di
Neutroni


Buco Nero

Maggiore densità porta a maggiore curvatura

Per oggetti che si muovono attorno a una curvatura estrema, dalla prospettiva lontana di un osservatore:

- Il tempo rallenta
- Le distanze diminuiscono

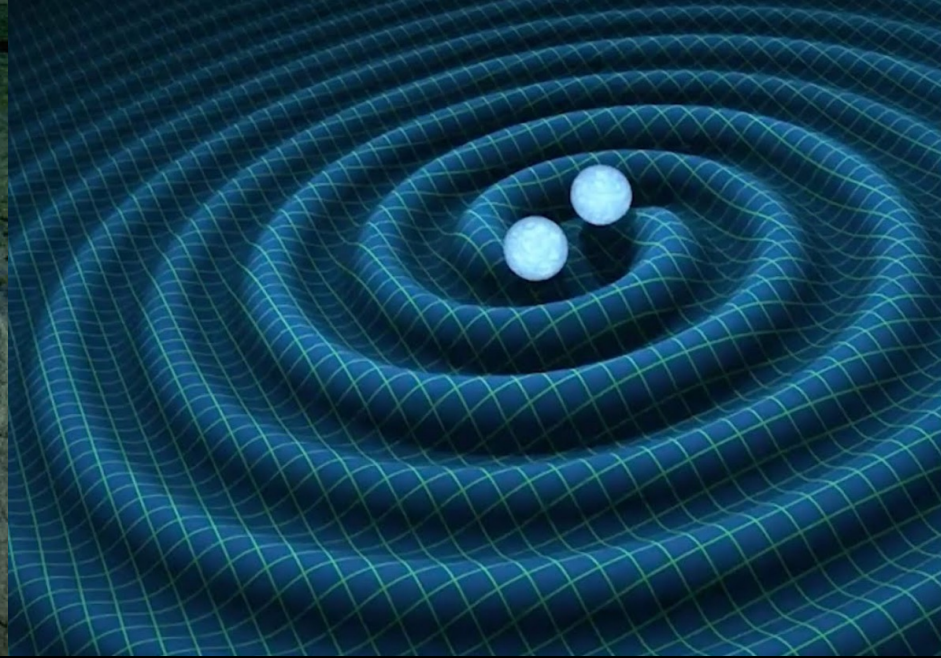
LA GEOMETRIA CURVA LA LUCE...
OSCAR 2015 "MIGLIORI EFFETTI SPECIALI"
AL FILM INTERSTELLAR



Interstellar, Paramount Pictures
Directed by Christopher Nolan
Image based on calculations by Kip Thorne and Double Negative Co.

1916:

Einstein predice l'esistenza delle onde gravitazionali

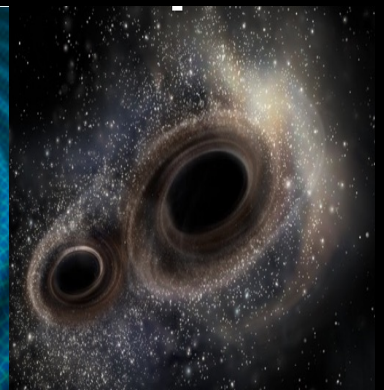
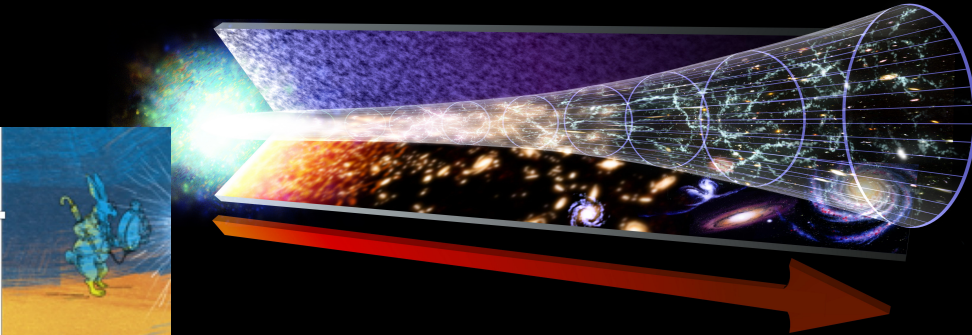
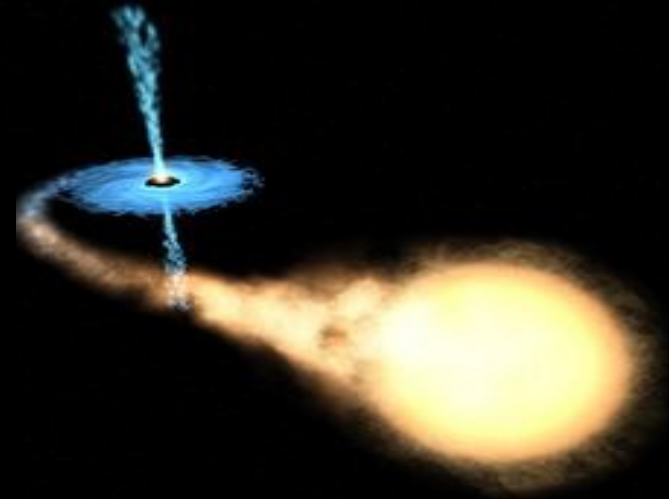
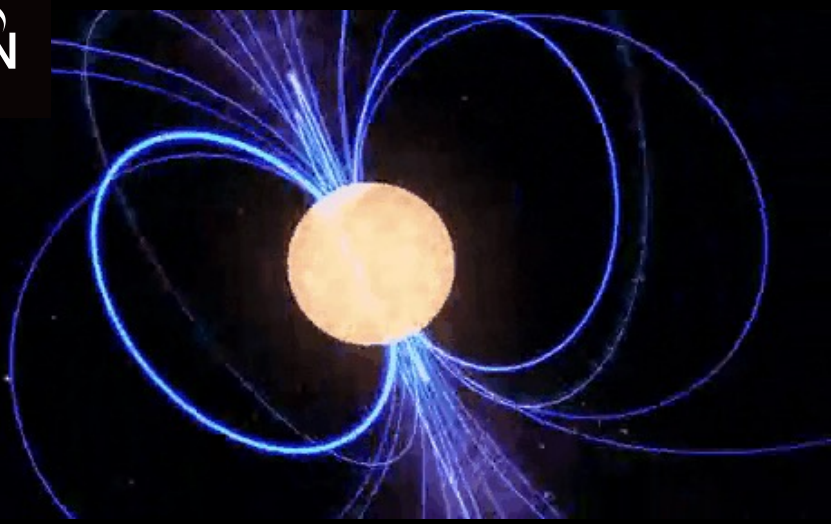


Acqua come
fluido elastico

Se sollecitata, si
generano onde

Lo spazio-tempo di
Einstein è elastico!

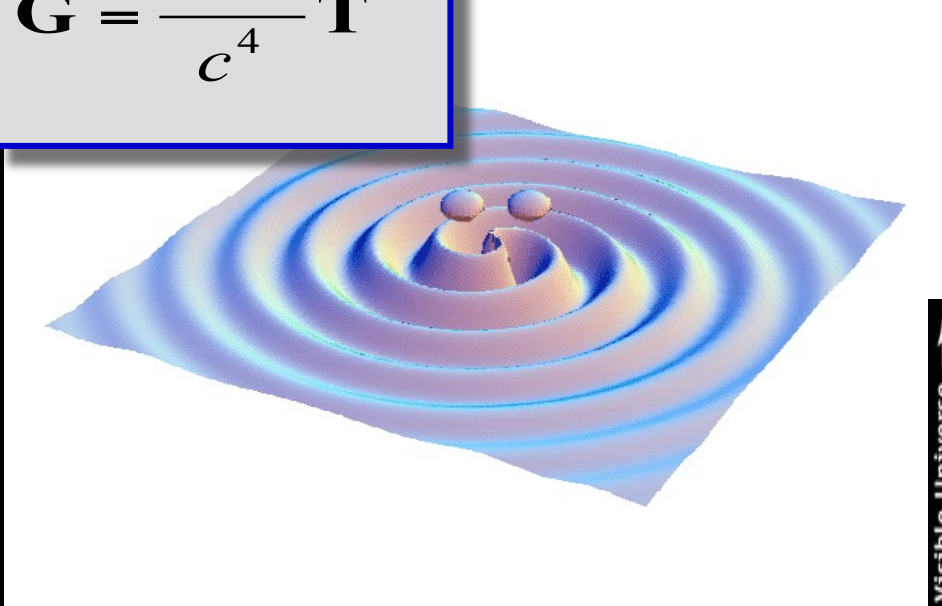
Se sollecitato, si
generano onde



PRINCIPALI OBIETTIVI DELLA RICERCA

Verifica delle predizioni di Einstein

$$\mathbf{G} = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}$$



COSMOLOGIA

Arrivare al tempo di Planck

Studio della materia e della gravità in condizioni estreme.

Possibilità di importanti ricadute tecnologiche

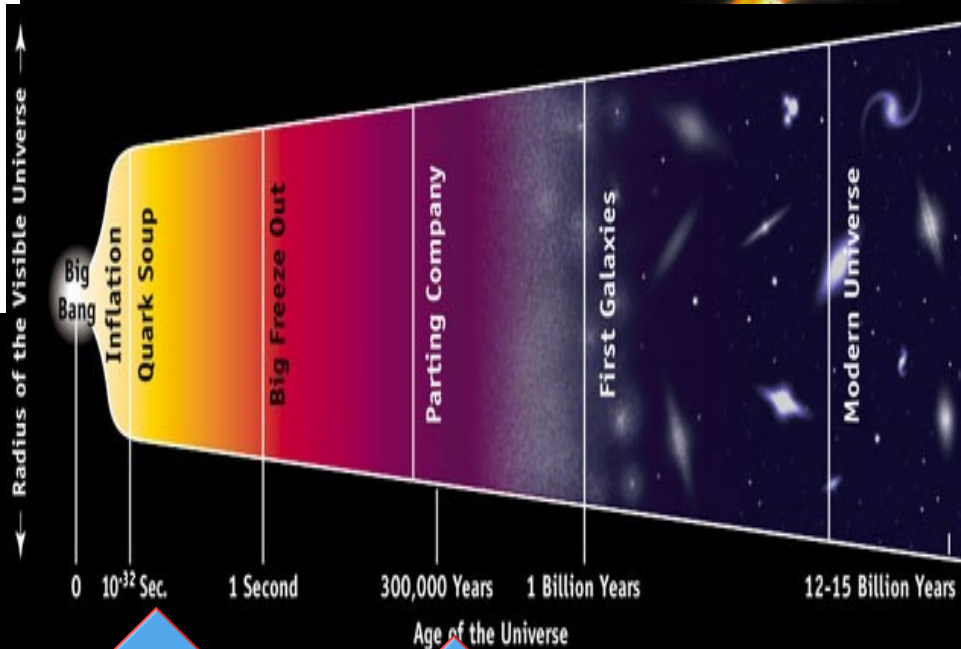
Astronomia e Astrofisica:

Andare oltre il visibile,

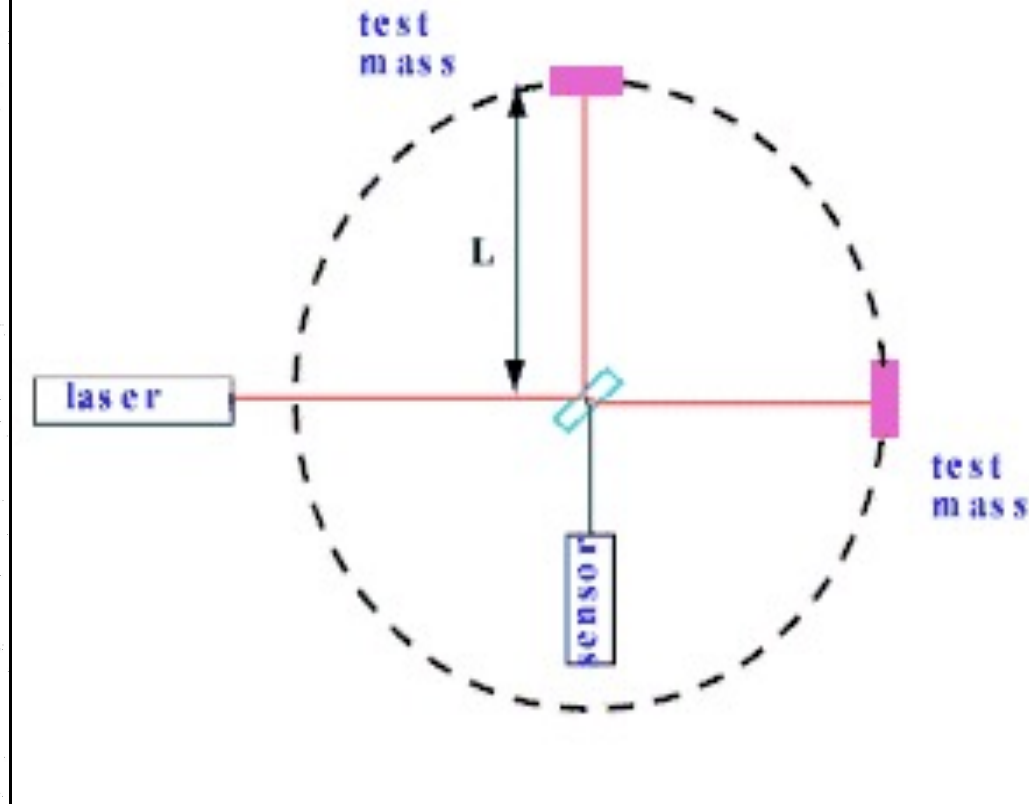
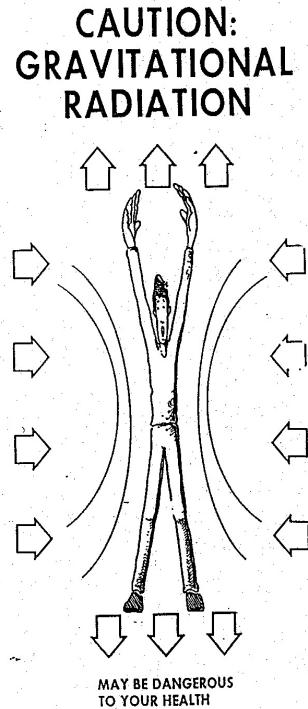
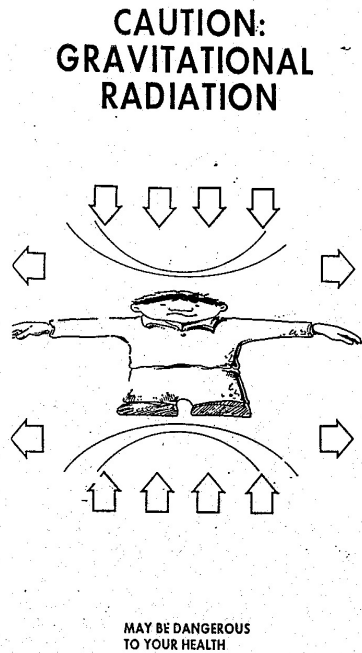
Studiare BH, NS e SN.

Studiare e comprendere GRB

Studio di alcuni modelli di materia oscura



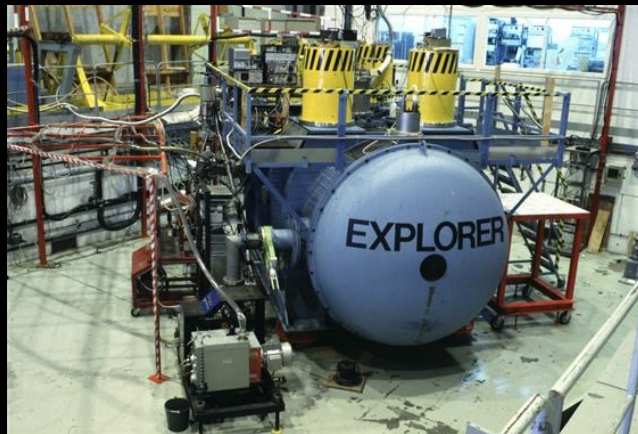
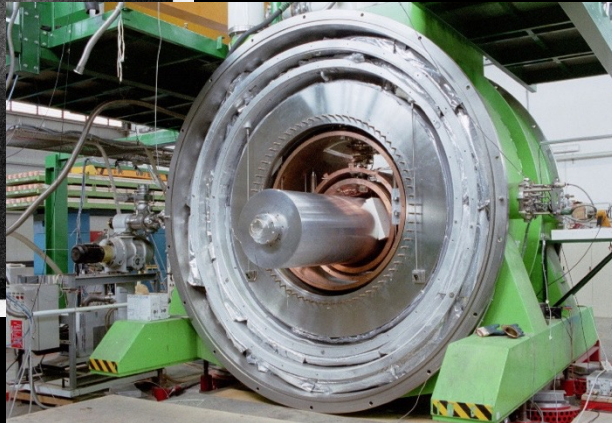
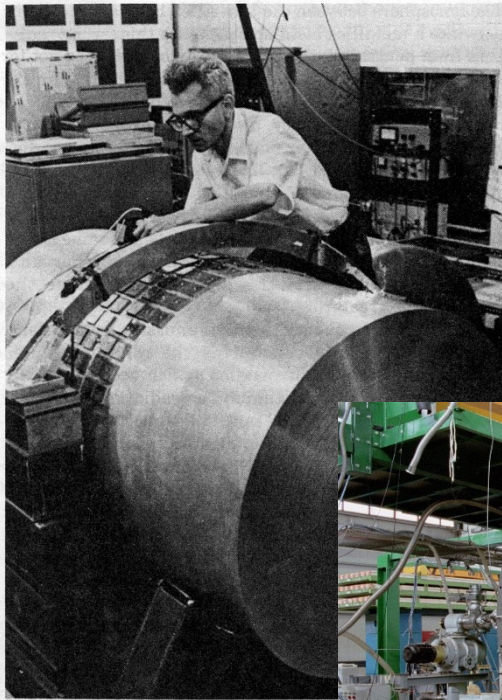
IL PRINCIPIO DELLA MISURA



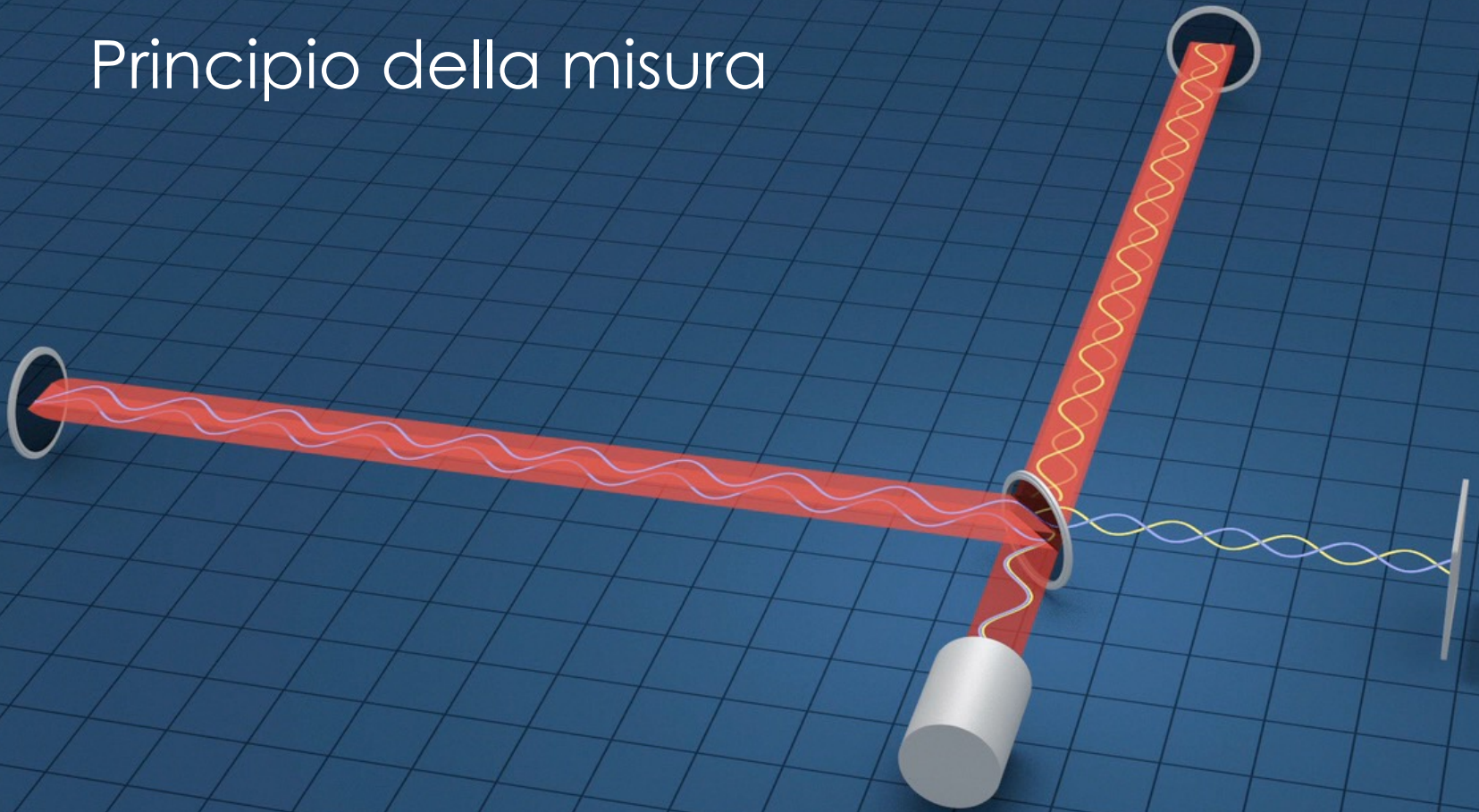
$$h = \frac{\Delta L}{L} \sim 10^{-21}$$

Il problema della misura sono i RUMORI,
ad esempio sismico ($\sim 10^{-8} \text{ m}$),
vibrazioni termiche ($\sim 10^{-12} \text{ m}$)

Oltre 50 anni di lavoro e progressi



Principio della misura



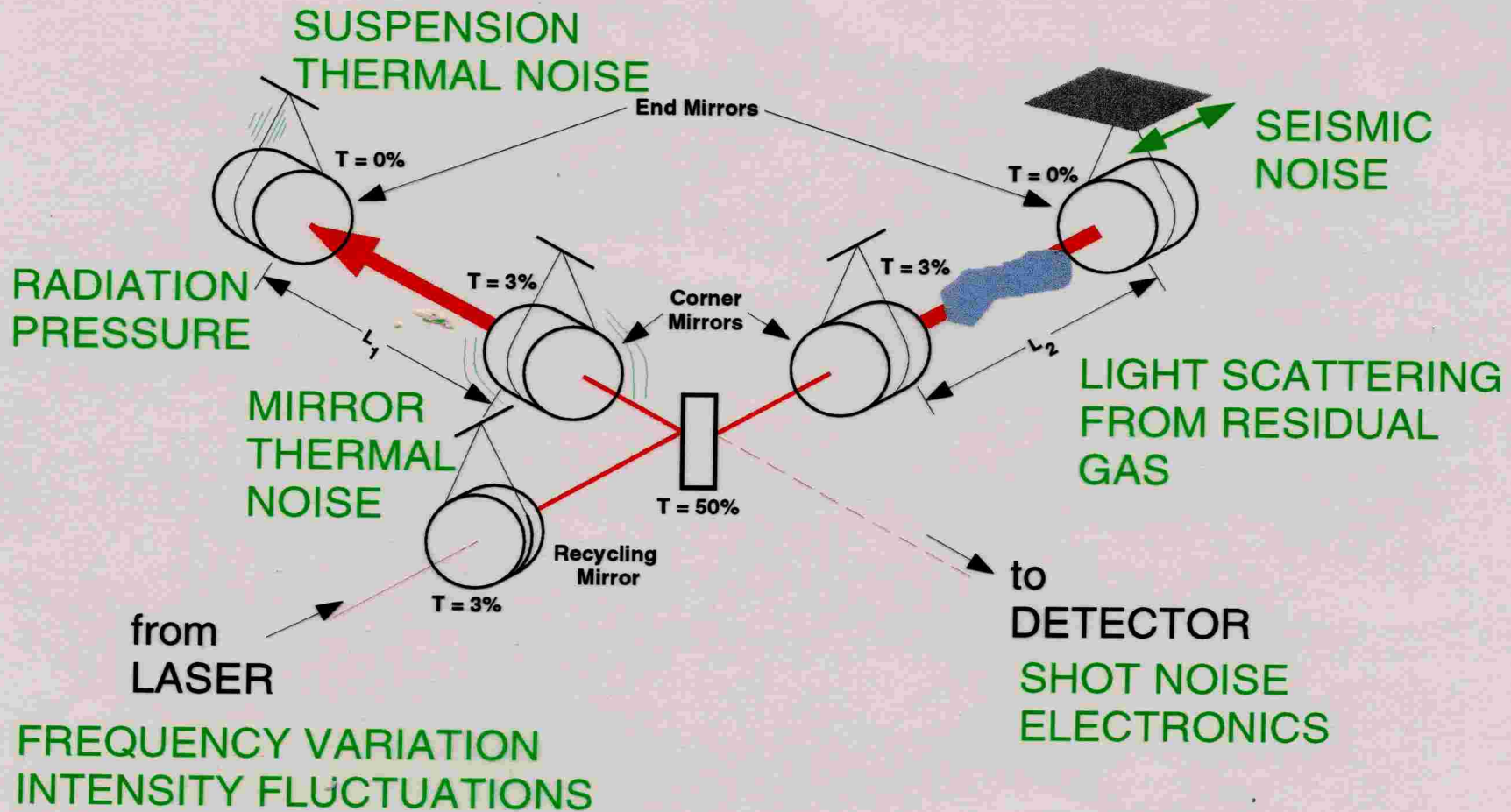
Qui l'effetto dello sfasamento dovuto all'onda è molto esagerato !

$$\Delta\varphi_{GW} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L_{GW} = \frac{4\pi}{\lambda} hL \approx 10^{-11} \text{ rad}$$

Servono bracci lunghi per aumentare il segnale misurato

..E COME FUNZIONANO VERAMENTE..

20

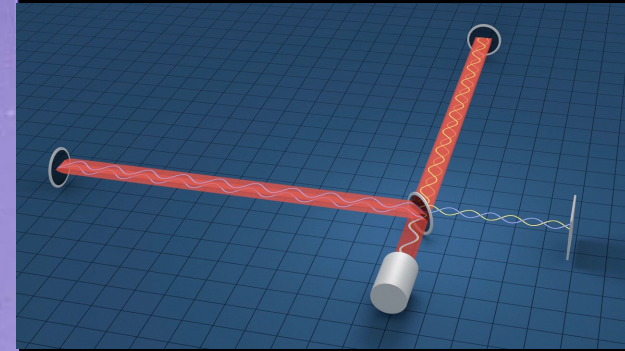


Laser
Nd:Yag
infrarosso

Segnale in uscita

Beam Splitter

Specchio



Tubo Ovest

3 km

Tubo Nord

3 km

7000 m³ a 1 atmosfera/10¹² ...molto simile al vuoto interstellare.

Principio superattenuatore: Memex-Galileo p. 66 2018 dal minuto circa 21'50"

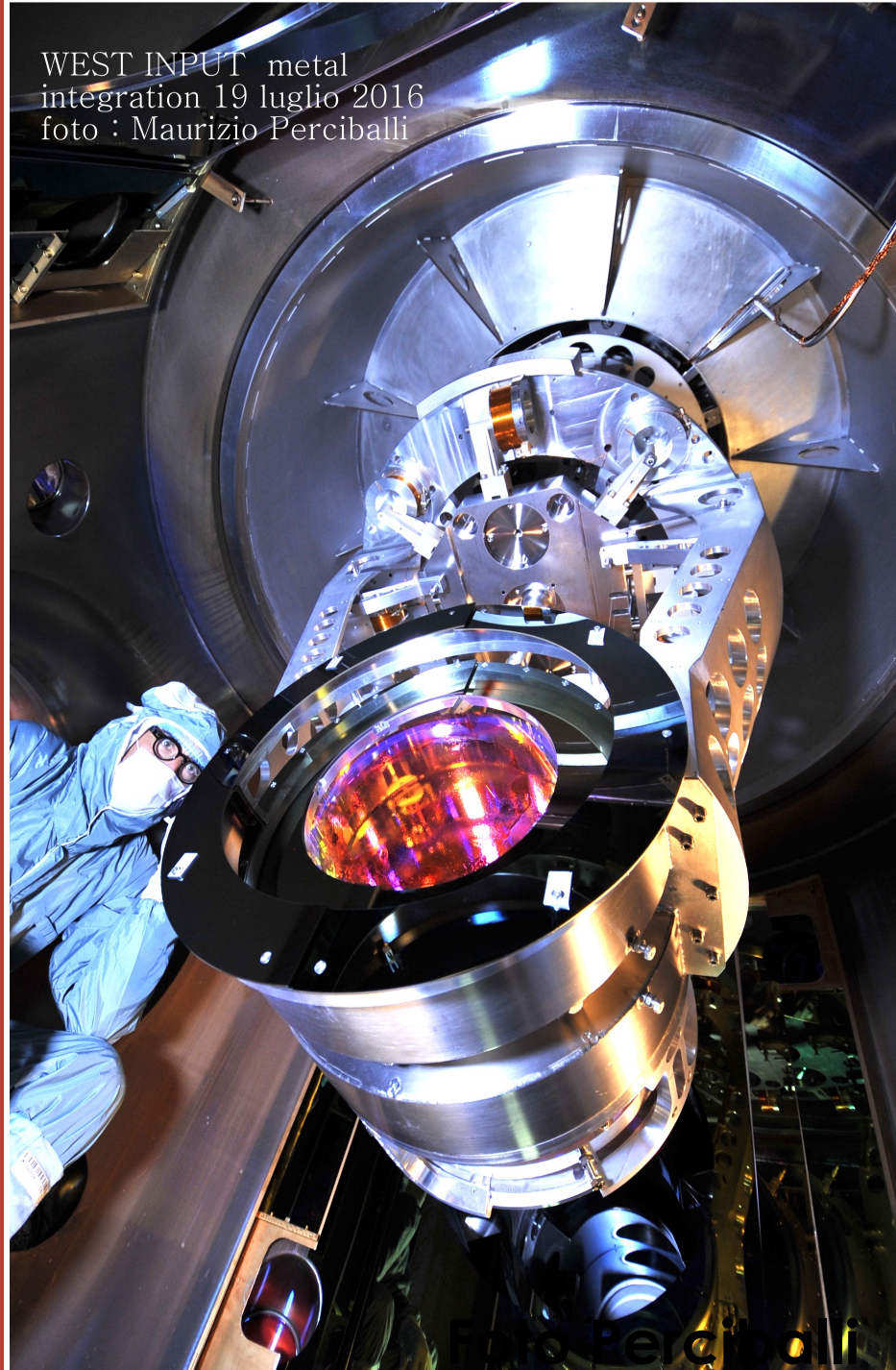
**Specchio
42 kg
35 cm diametro**

foto : M.PERCIBALLI 2015-NORTH-END

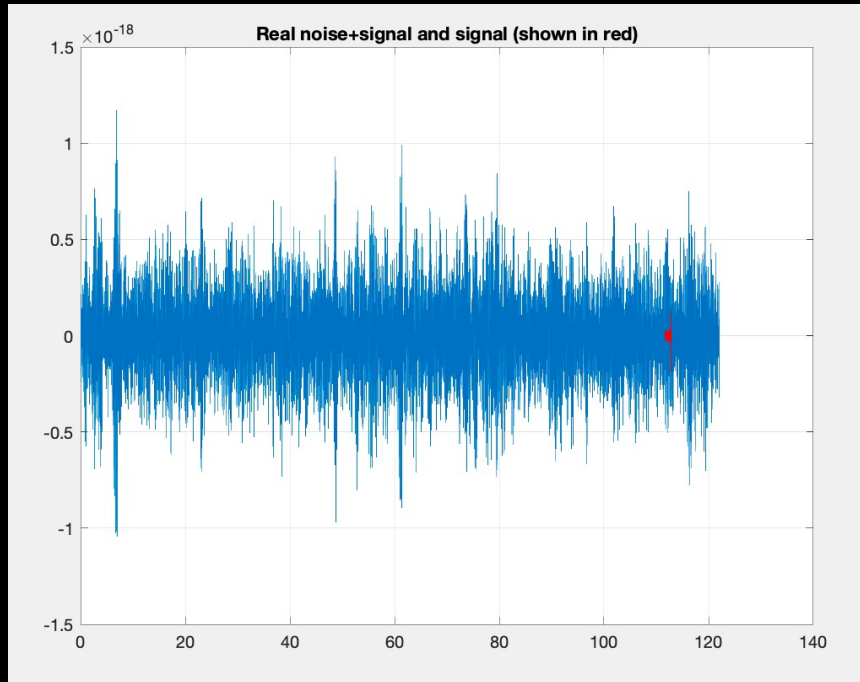
**Beam splitter
34 kg
55 cm diametro**

FOTO: MAURIZIO PERCIBALLI (bs 2014)

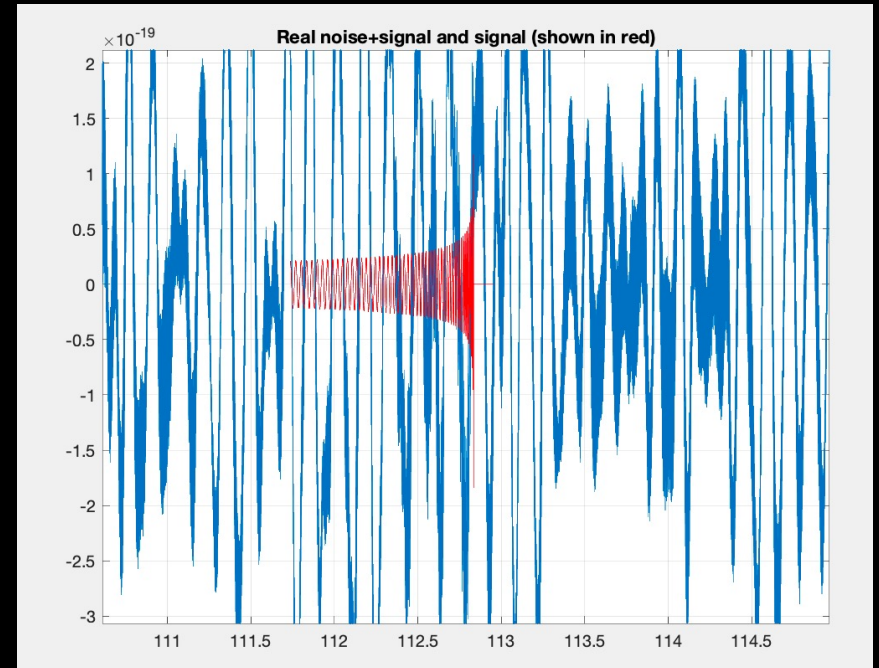
WEST INPUT metal
integration 19 luglio 2016
foto : Maurizio Perciballi



I SEGNALI SONO NASCOSTI NEL RUMORE

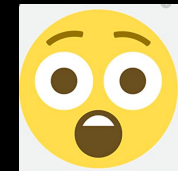


Tempo (ascisse) 0 - 140 s.



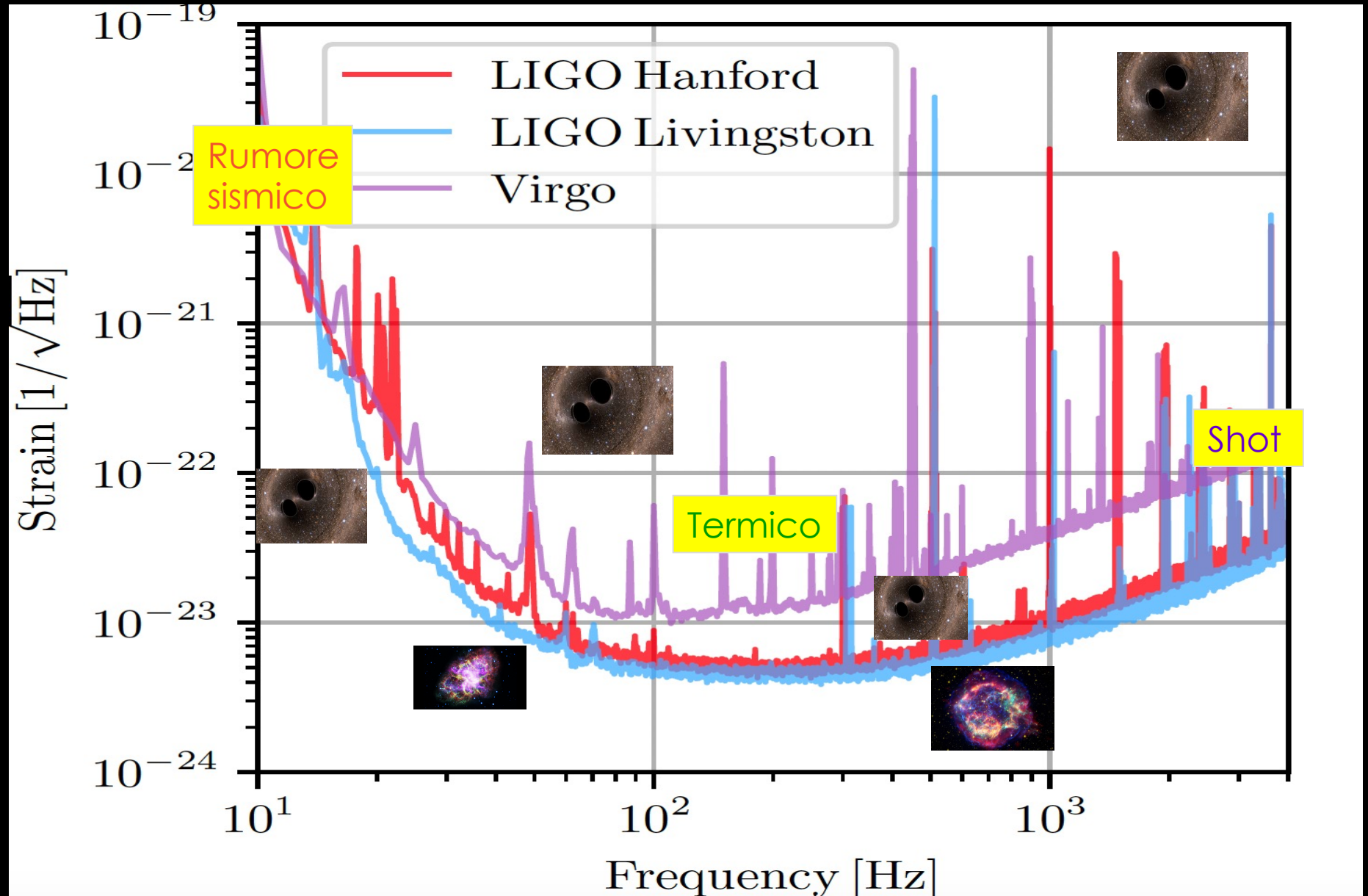
ZOOM

Come è possibile vederli ?



O3.

LA SENSIBILITA' DEI RIVELATORI



Quale degli eventi mostrati nel grafico potrebbe essere osservato ?

LIGO-VIRGO meeting in Sapienza 14 settembre 2012

Sapienza University, Physics Department
Marconi building

Scientific committee

- Luca Barack
- Gregory Bland
- Shahab (March 2013 local chair)
- Robo Kico (September 2012 local chair)
- Thomas
- Christensen
- Frey
- K. Sutton
- Mandic
- Robertson
- Mueller

Local committee

- Pia Astor
- Eugenio Coccia
- Alberto Golia
- Maria Colombini
- Andrea Conte
- Sabrina D'Antonio
- Viviana Falanga
- Sergio Frasca
- Ettore Majorana
- Luca Tasciaroni
- Cristiano Palomba
- Maurizio Perciballi
- Piolo Puppo
- Piero Riegnani
- Fulvio Ricci
- Alessio Rocchi

Organizational committee

- Mancini
- Errusta

EGO
IN
SAPIENZA
Virgo



10 - 14 September 2012 Roma, Italy

14 settembre 2015





PRL 116, 061102 (2016)

Selected for a **Viewpoint** in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410_{-180}^{+160} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36_{-4}^{+5}M_{\odot}$ and $29_{-4}^{+4}M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62_{-4}^{+4}M_{\odot}$, with $3.0_{-0.5}^{+0.5}M_{\odot}c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

Questa è stata **la prima osservazione diretta di onde gravitazionali e la prima osservazione del merger di un sistema binario di buchi neri**


$$E = Mc^2$$

$$M = \text{😊😊😊}$$

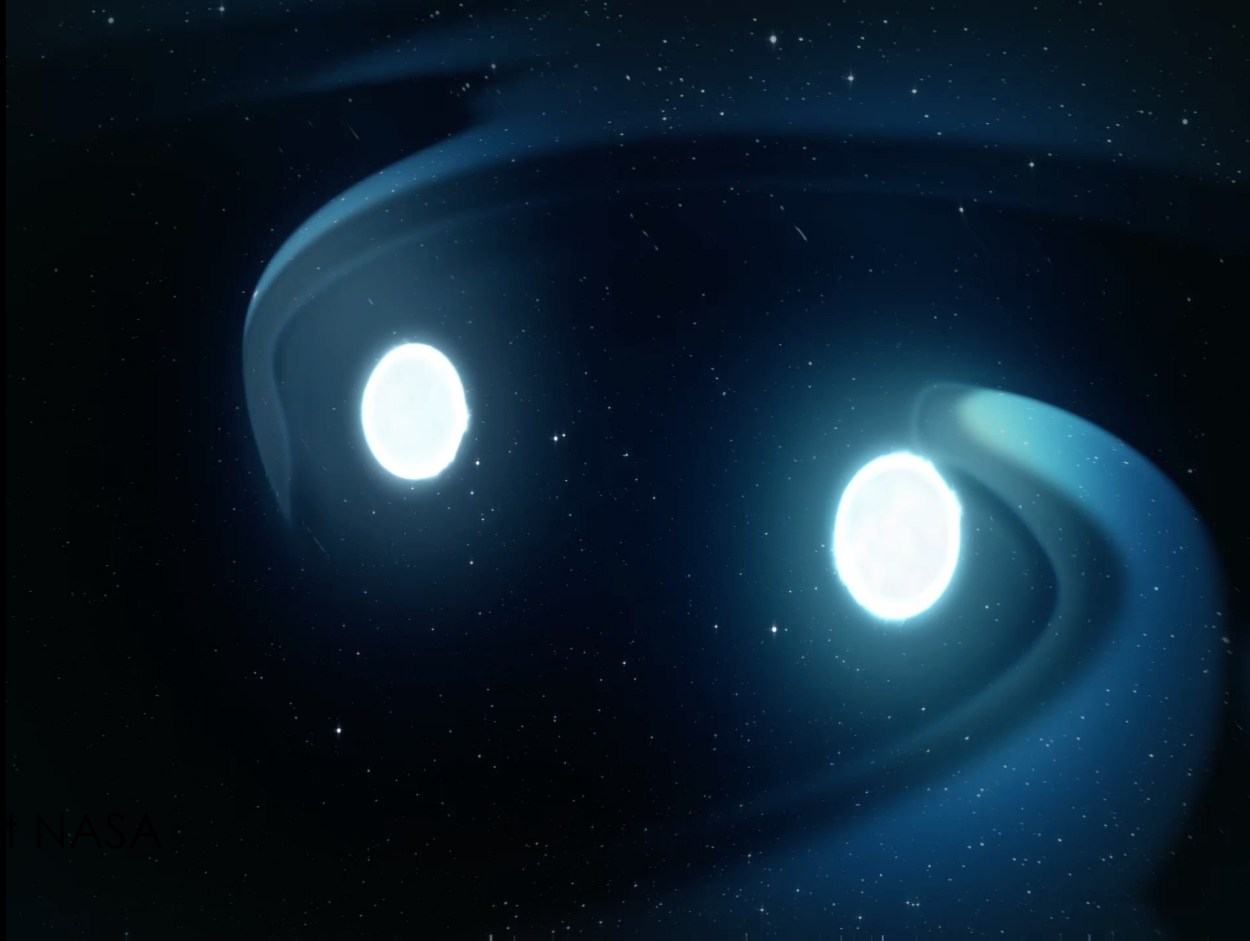
3 Soli convertiti in onde gravitazionali

Circa l'energia che l'umanità consuma in
un miliardo di miliardi di miliardi di anni

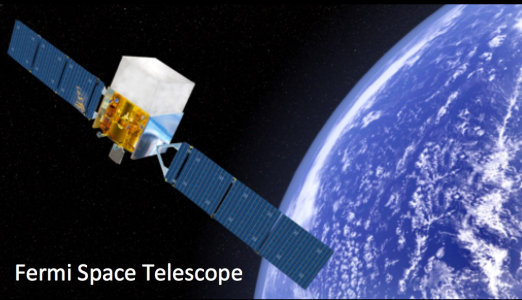
...in frazioni di un secondo !

*Raggiungendo una velocità tale da poter andare
dalla Terra alla Luna in 10 secondi*

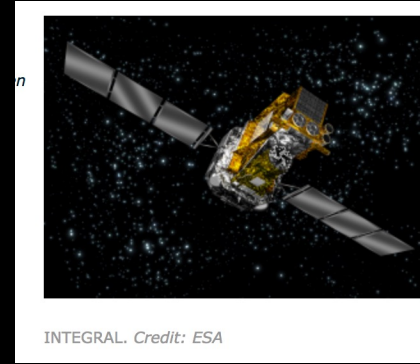
***130 MILIONI DI ANNI FA...IN UNA GALASSIA
MOLTO MOLTO LONTANA***



NASA



Fermi Space Telescope



INTEGRAL. Credit: ESA

17 agosto 2017

2 stelle di neutroni

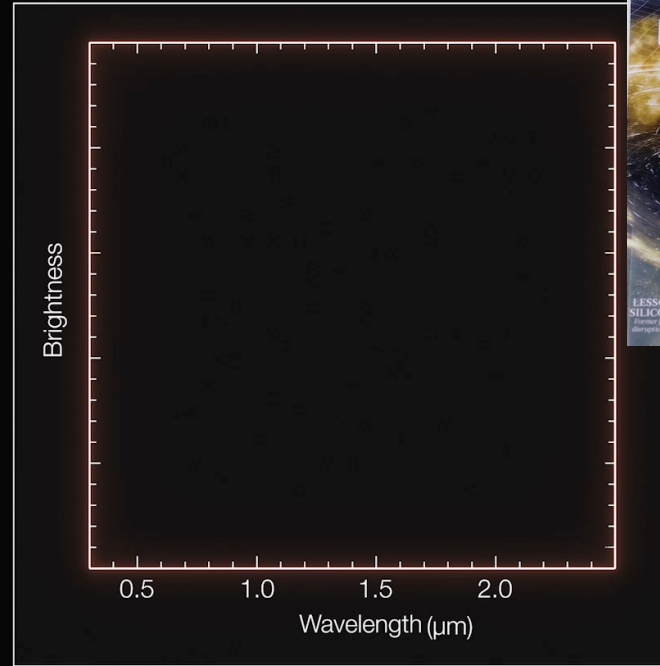
3 rivelatori gravitazionali

100 telescopii

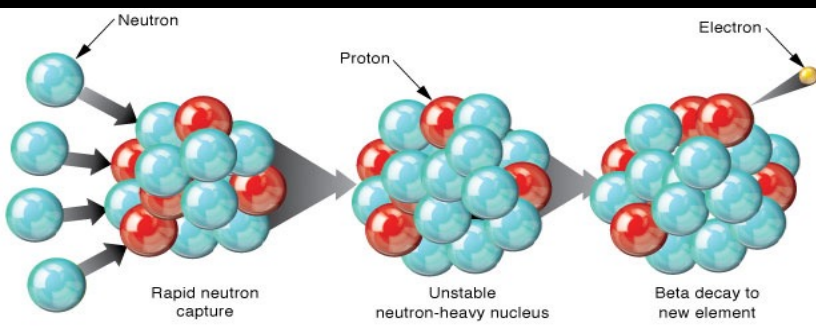


The Astrophysical Journal Letters, 848:L13
2017 October 20

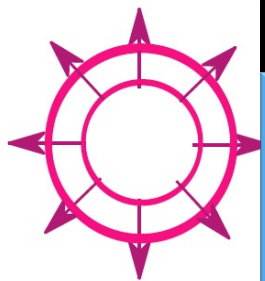
KILONOVA



Time: -1225 days



A banner displaying the flags of 45 countries and territories, arranged in two rows. The top row includes Argentina, China, India, Israel, Japan, Mexico, and the United States. The bottom row includes South Africa, South Korea, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey, and the United Kingdom. The text below the flags reads: 'The discovery and analysis of GW170817 and its associated electromagnetic events involved researchers working in 45 countries and territories.'



Misura del tasso di espansione dell'Universo

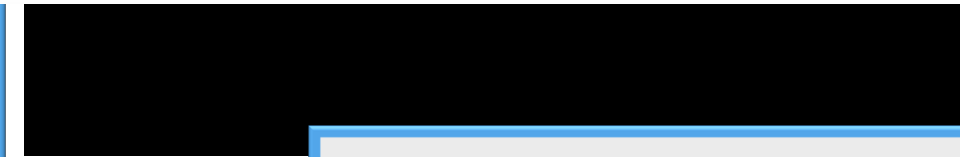


Misura del tasso di espansione dell'Universo



Confronto della velocità dell'onda elettromagnetica e gravitazionale: evidenza che le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce

Studio della struttura e composizione di oggetti assolutamente "estremi"



Conferma dell'origine degli "short gamma ray bursts". Informazioni sui modelli

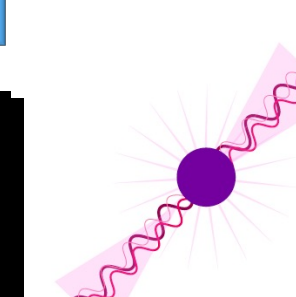
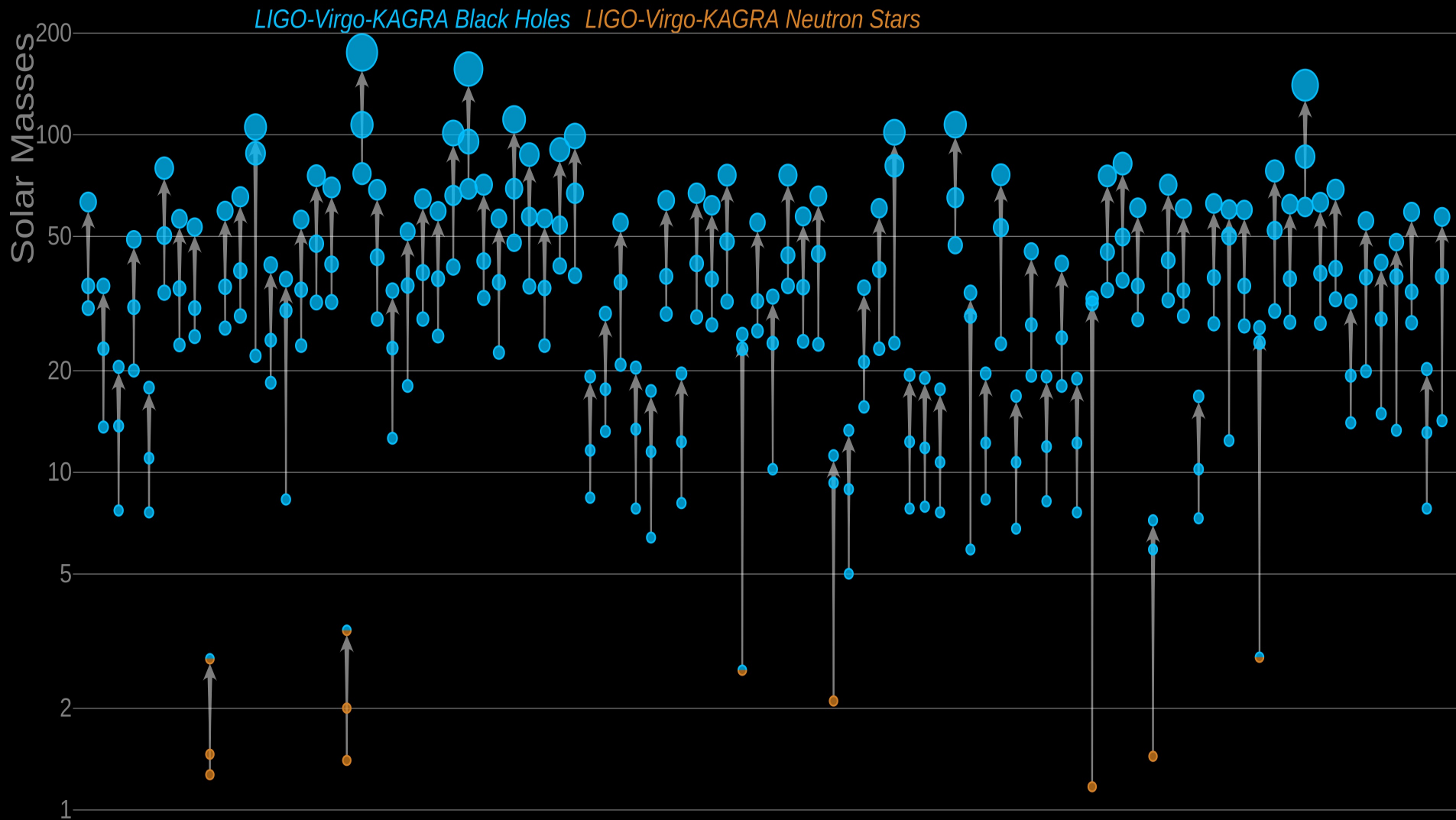


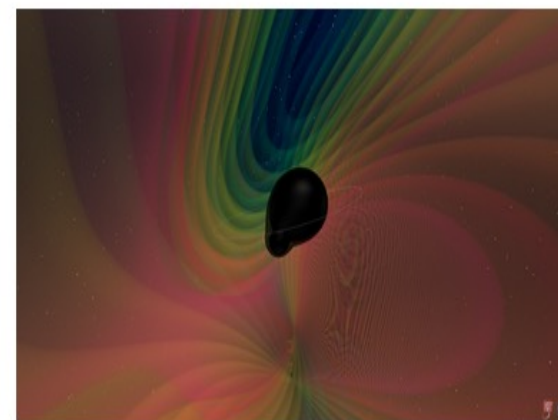
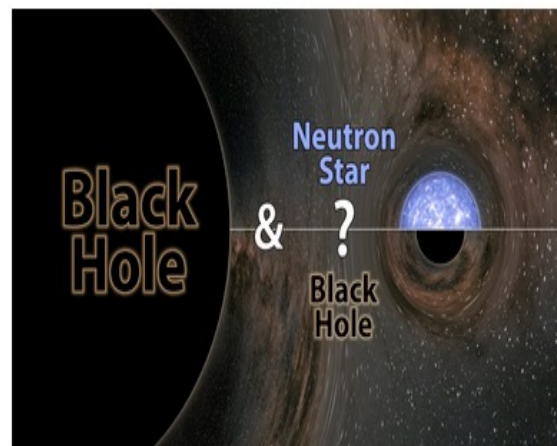
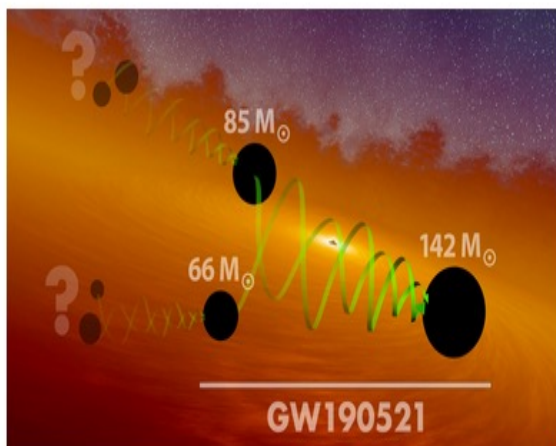
TAVOLA PERIODICA DEGLI ELEMENTI



Siamo
polvere
di stelle

2021: Il terzo catalogo di sorgenti di onde gravitazionali





GW190521

La prima evidenza di un Merger IMBH, ossia la formazione di un BH molto massivo,

Il sistema più massivo e distante fra tutti

150 M_{\odot}

D=7 miliardi di anni luce

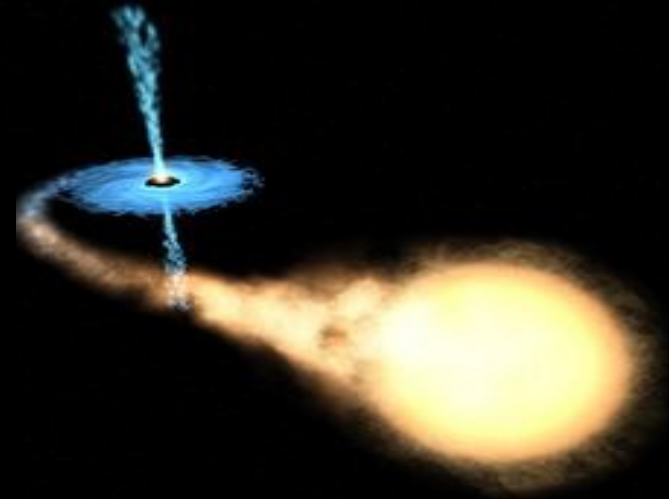
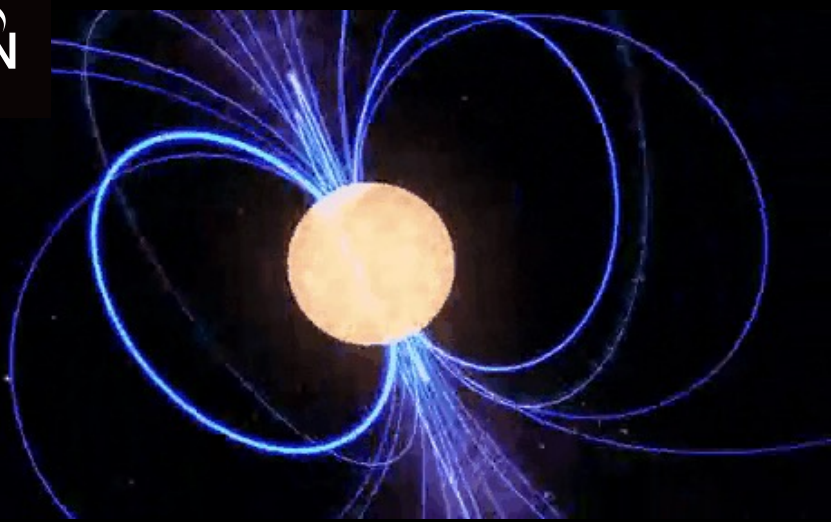
GW190814

La scoperta del più leggero BH o della più pesante stella di neutroni ?

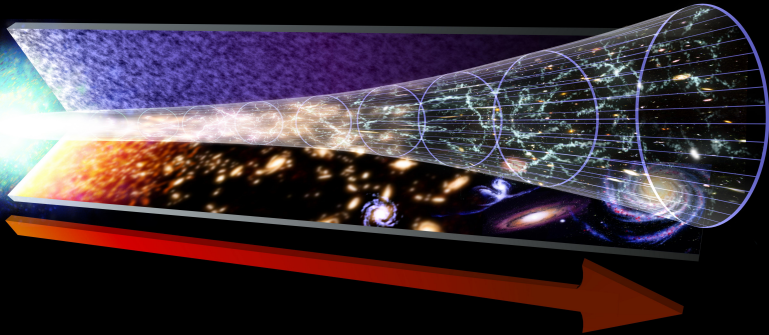
GW190412

Il sistema di 2 BHs con maggior sbilanciamento fra le masse dei 2 componenti

[Image credit: Image: Robert Hurt, IPAC/Caltech]

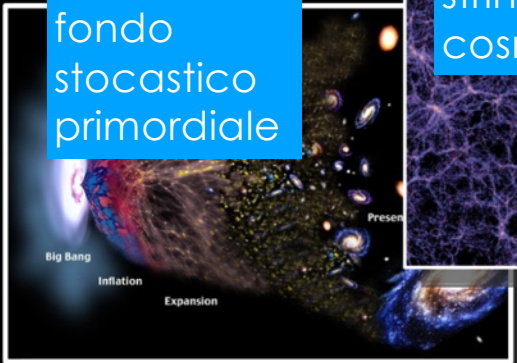


By L. Ralli

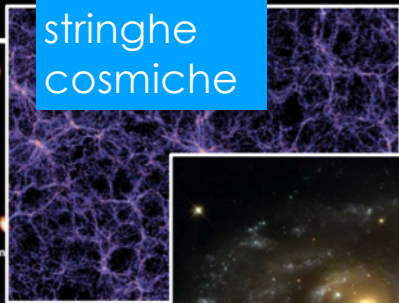


Lo spettro di onde gravitazionali

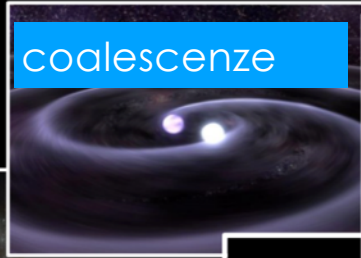
fondo
stocastico
primordiale



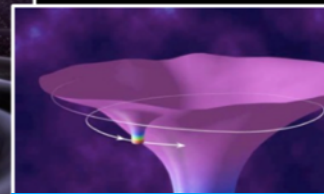
stringhe
cosmiche



coalescenze



coalescenze



supernovae



buchi neri
supermassivi



coalescenze



pulsar



rete di
radiotelescopi



timing
array



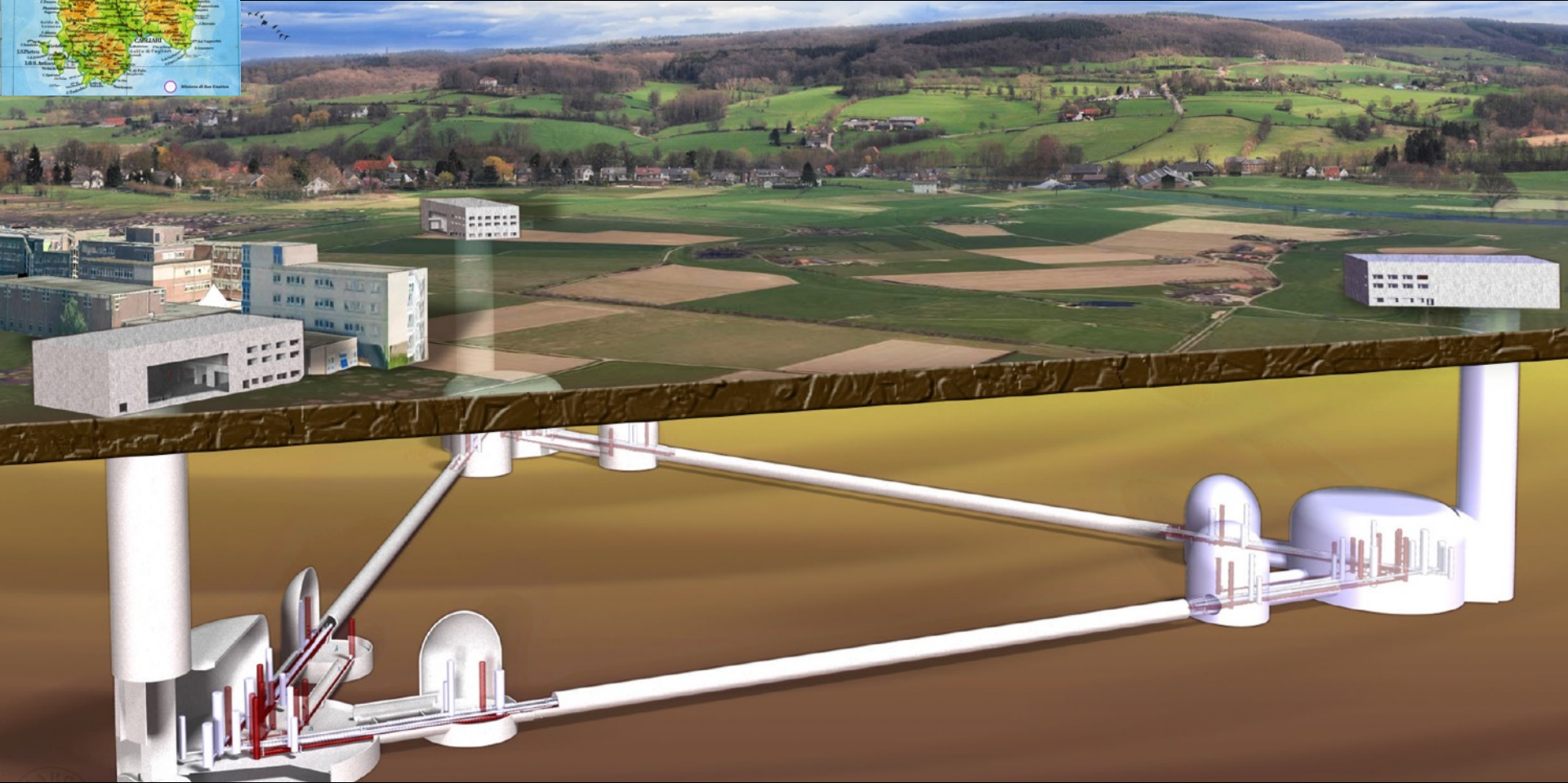
rivelatori
spaziali



rivelatori
terrestri

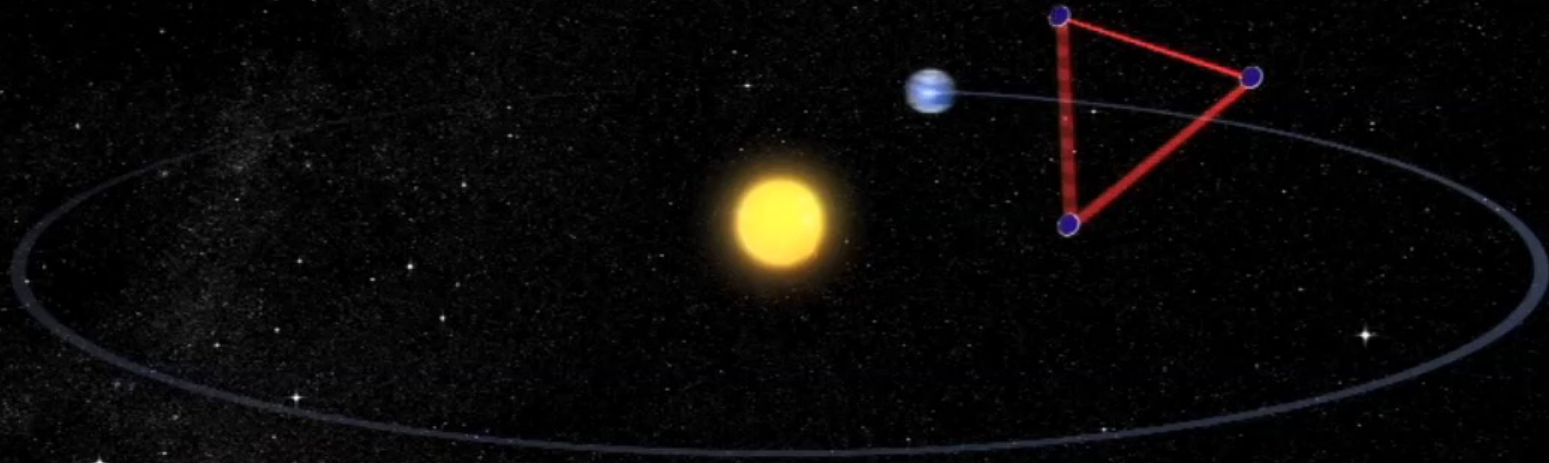


Einstein telescope



> ~ 2030

LISA: una costellazione di satelliti che orbiteranno attorno al Sole



Informazioni e dati pubblici @....

<https://www.gw-openscience.org/about/>



Gravitational Wave Open Science Center

🏠 Data ▾ Software ▾ Online Status ▾ About GWOSC ▾

The Gravitational Wave Open Science Center provides data from gravitational-wave observatories, along with access to tutorials and software tools.



LIGO Hanford Observatory, Washington

(Credits: C. Gray)



LIGO Livingston Observatory, Louisiana

(Credits: J. Giaime)



Virgo detector, Italy

(Credits: Virgo Collaboration)

<http://public.virgo-gw.eu/>

<https://www.ligo.org/public.php>

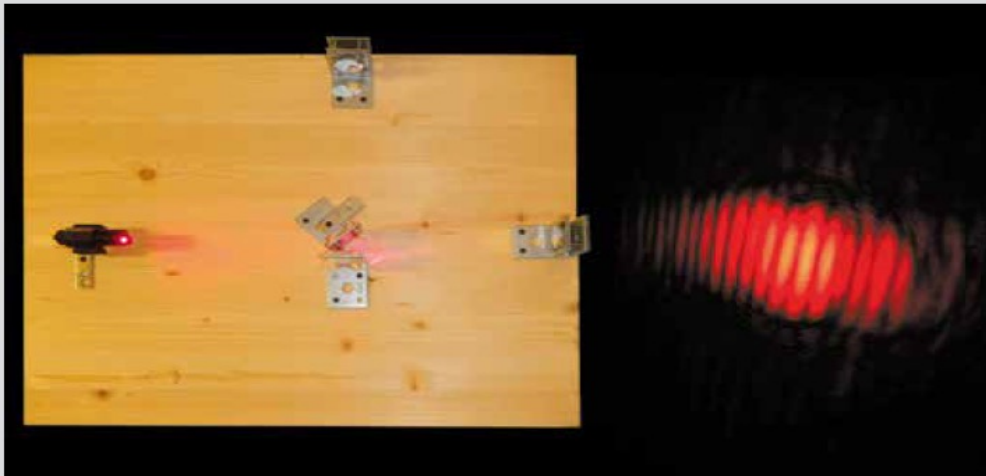
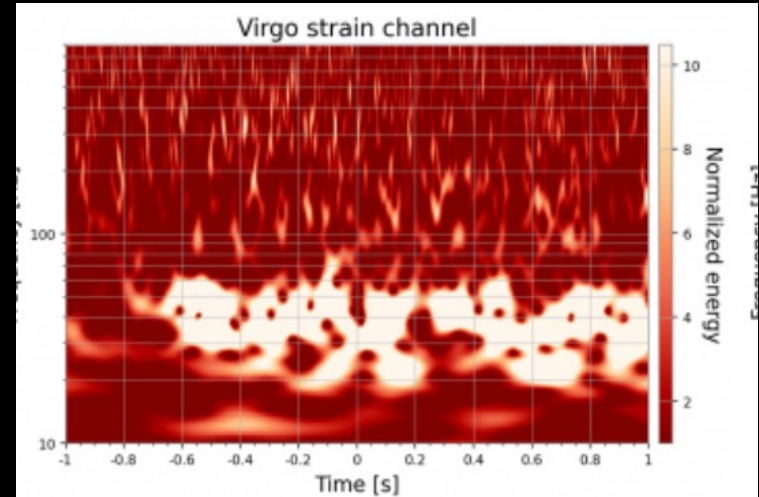


GWitchHunters

<https://www.zooniverse.org/projects/reinforce/gwitchhunters>

www.asimmetrie.it

Numero 25: Interferometro fai da te.



a.
L'interferometro fai da te (a sinistra) è un esempio di interferenza prodotta (a destra). L'interferometro ha bracci di lunghezza fissa, ma la struttura sulla quale si montano gli specchietti consente di muoverli su tre assi, quanto basta per produrre (o distruggere) la figura di interferenza.



*A 100 anni dalle previsioni di Einstein
ha avuto inizio l'Astronomia
gravitazionale*

Concludo con una nota personale ...

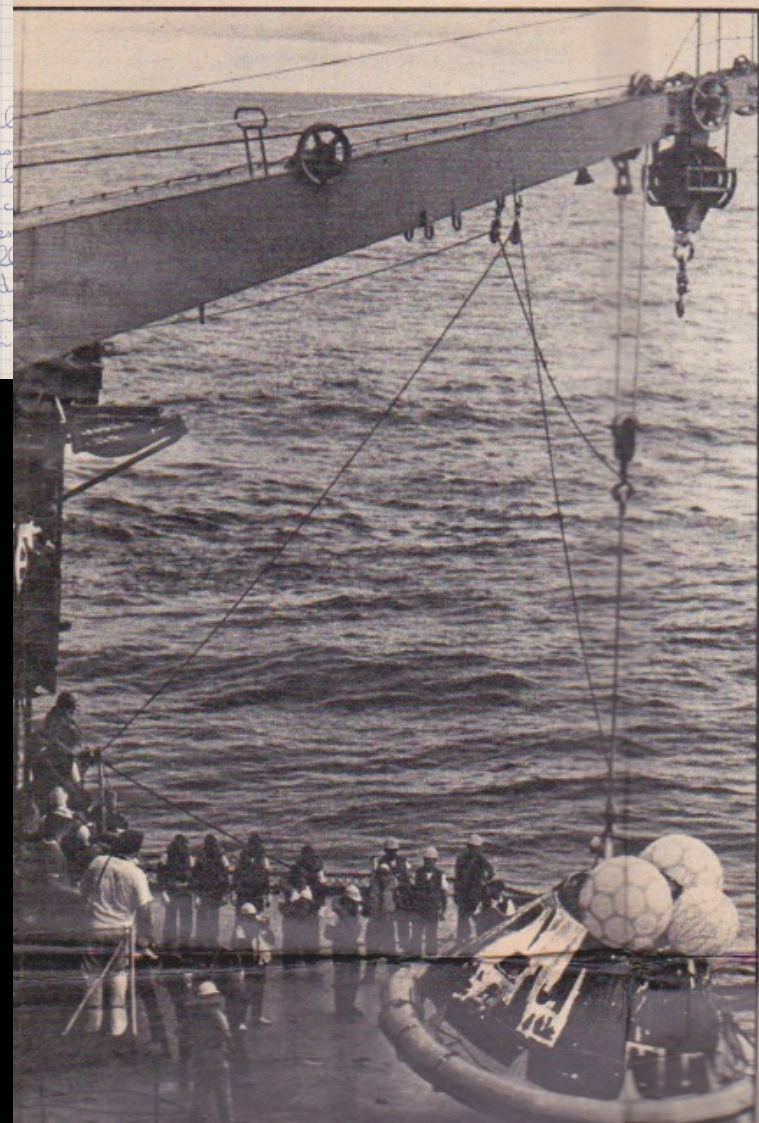
HA VINTO L'UOMO

Ha vinto l'uomo - È un'espressione di gioia che fa capire quanto sia grande l'uomo che conquistato il mondo, ha vinto anche contro le più macchine da lui create. Questa missione, poi, ha dimostrato il coraggio, la potenza e la forza dell'uomo. Aveva detto essere non ha mai perso nulla sino la missione di "Apollo 13", non è stata una perdita. Ha avuto successo missione perfettamente riuscita. L'entusiasmo di non hanno dimostrato la calma di non hanno dimostrato la potenza dell'uomo. Gli uomini hanno fatto quanto potevano per salvare tre uomini e ci sono riusciti.

fra i molti problemi che ci troviamo ad affrontare nelle lunghe ore del difficile e intormentato ritorno ce n'è uno che a citarlo farà sorridere ma che per noi non fu per il secondario: il problema dell'orina. Normalmente a bordo delle capsule Apollo gli astronauti orinano in uno speciale recipiente che elimina poi il liquido espellendolo. L'orina, cioè, viene «spruzzata» nello spazio dove ovviamente si disperde. Dopo l'incidente pensammo che sarebbe stato as-

Un problema assai grave che ci toccò affrontare fu quello d'imboccare correttamente il «corridoio» per il rientro nell'atmosfera. Dovevamo, cioè, presentarci al contatto con gli strati densi dell'atmosfera con un angolo inferiore ai sei gradi e mezzo e a una determinata velocità. Se avessimo sbagliato l'angolo e la velocità avremmo potuto «rimbalzare» verso l'infinito, abbandonando ogni

Vorrei tornare nello



DAL momento in cui siamo di servizio e poi il rientro di nuovo nella rotta dell'incidente in poi avremmo provveduto operazioni e limite dell'emergenza, avventurati a un piano di mezzi di fortuna. Infilare nell'atmosfera tornammo. E tutto l'ultimo stadio fu la batteria. Utilizzammo perfino a bere tranquillizzanti.

Devo confessare che è stato un po' abituarmi, dopo «inventato», a seguire di routine. Mi parve di poter schiacciare gli stessi strumenti, compresi di un normalissimo ristorante mi sentii imbarazzato a comportarmi in modo «

È difficile dire, oggi, quanta parte dell'incidente del modulo meteorite può averlo colpevole essere stato un guasto alla lacerazione dei serbatoi a blocco delle batterie d'energia. Il servizio, ormai sganciato, era un obolo della capsula del disastro. Sapevamo che era dato a pezzi ma non immaginabile macello. Un intero modulo, dal foro, il modulo e le istruzioni interne. Avevamo nello spazio molti pezzi. Io non avevo visto volteggiare altri se n'erano andati. Credo che per noi sia stato un modulo di servizio aveva una parte del suo contenuto il nostro «treno spaziale» una notevole diminuzione di fatica meno faticoso il compito. Con il modulo di servizio formalmente intatto avrebbe potuto rispondere i comandi. Debbo anche dire certo che tutto il modulo se fuori uso. Quando succedemmo di considerarlo un pezzo e ci affidammo al Lem. Fu buona volontà e qualche volta remmo riusciti a rimettere in funzione, almeno per alcuni giorni, il modulo. Ricordo che a bordo parlavo di eventualità. Dicemmo che l'avesse fatta avremmo lizzare quel che restava del modulo.

Se l'incidente fosse capitato non credo proprio che potessi tornare a casa. Anzi, non l'avrei fatta di sicuro.

Tornerei nello spazio? In molti dopo il rientro «Sì, tornerei». Anzi, alcuni dicono «Sì, tornerei». Anzi, alcuni dicono «Sì, tornerei». Anzi, alcuni dicono «Sì, tornerei». Anzi, alcuni dicono «Sì, tornerei».





Stoccolma,
Dicembre 2017

Il prossimo run scientifico O4 ripartirà a fine 2022



Credit NASA

Restate «sintonizzati» su noi !!